

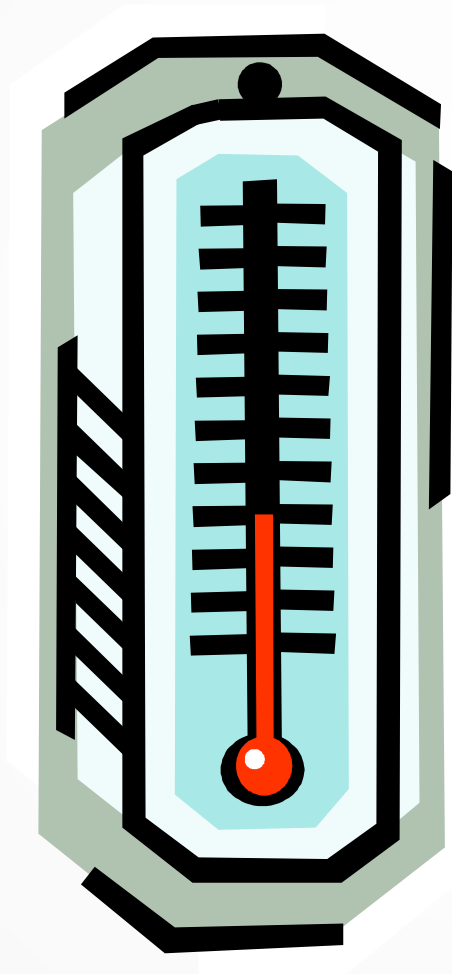


“온도계의 정확성은 어떻게 알 수 있는가?”

측정의 문제와 온도의 발명

2014년 5월 8일 정동욱

표준 온도계의 고정점



100°C - 끓는점

0°C - 어는점

여러 과학자들이 사용한 고정점

인물	연도	고정점
산크리토리우스	1600년경	촛불의 불꽃 - 눈
치멘토 아카데미	1640년경	겨울철 극한 - 여름의 극서
오토 폰 구에리케	1660년경	첫 번째 밤 서리
로버트 후크	1663년	증류수의 어는점
크리스티안 하위헌스	1665년	물의 끓는점 - 물의 어는점
호노리 파브리	1669년	눈 - 여름의 최고 더위
호아침 달렌스	1688년	물의 어는점 - 버터의 녹는점 또는 눈 - 깊은 지하실
에드먼드 핼리	1693년	깊은 동굴 - 알코올의 끓는점
아이작 뉴턴	1701년	눈의 녹는점 - 혈온
필리프 데 라 이레	1708년	물의 어는점 - 파리관측소 지하실
다니엘 파렌하이트	1720년경	소금/물/얼음 혼합물 - 체온
안데르스 셀시우스	1741년	얼음의 녹는점 - 물의 끓는점
브리태니커 백과사전	1771년	물의 어는점 - 밀랍 응고

표준 온도계의 고정점 정당화

- ▶ 표준 온도계 이외의 독립적인 판단 기준 필요
- ▶ 체온이 일정하지 않다는 것은 어떻게 알 수 있는가?
 - ▶ 고정점이 표시되지 않은 정성적 '온도경'만 있으면 충분
- ▶ 온도경 내 액체의 부피가 온도 증가와 함께 증가한다는 것은?
 - ▶ 신체 감각을 통해 정당화 가능
- ▶ 신체 감각은 어떻게 신뢰할 수 있는가?



감각의 오류

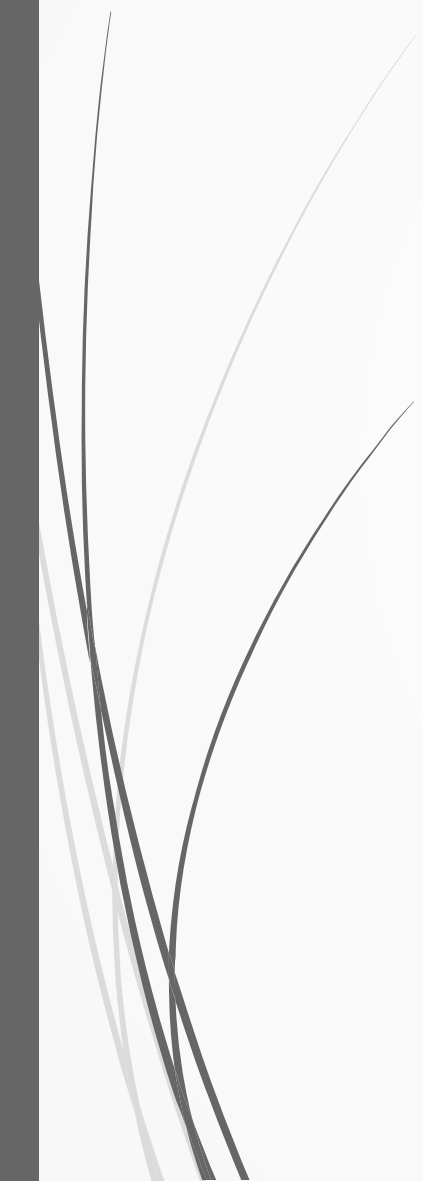
- ▶ 왼손은 얼음물에, 오른손은 뜨거운 물에 담근 후, 두 손을 미지근한 물에 함께 담가보자.
- ▶ 감각을 우선적인 기준으로 수용하는 이유는 그것이 다른 기준들에 앞서기 때문일 뿐, 다른 기준들보다 더 강한 정당성을 가지기 때문이 아니다.

‘존중의 원리’와 ‘진보의 요구’

- ▶ 기초적인 측정 기구들은 처음에는 감각과의 일치를 통해 정당화 되지만, 우리는 기구들이 감각을 향상시키고 심지어 교정하는 것도 허용한다. 기구의 사용은 감각을 기존 기준으로 존중함으로써 만들어지지만, 그것은 감각의 증언이 무조건적인 권위를 가진다는 것을 의미하지 않는다.
- ▶ 선행 기준과 후속 기준의 관계
 - ▶ 존중의 원리 : 후속 기준은 선행 기준에 의해 정당화됨
 - ▶ 진보의 요구 : 후속 기준은 선행 기준을 개선하기 위해 만들어짐



온도 기준의 발전 단계

- ▶ 1단계 : 신체 감각
 - ▶ 2단계 : 액체의 팽창을 이용한 온도경(thermoscope)
 - ▶ 3단계 : 물의 어는점과 끓는점을 고정점으로 삼은 수치 온도계
- 

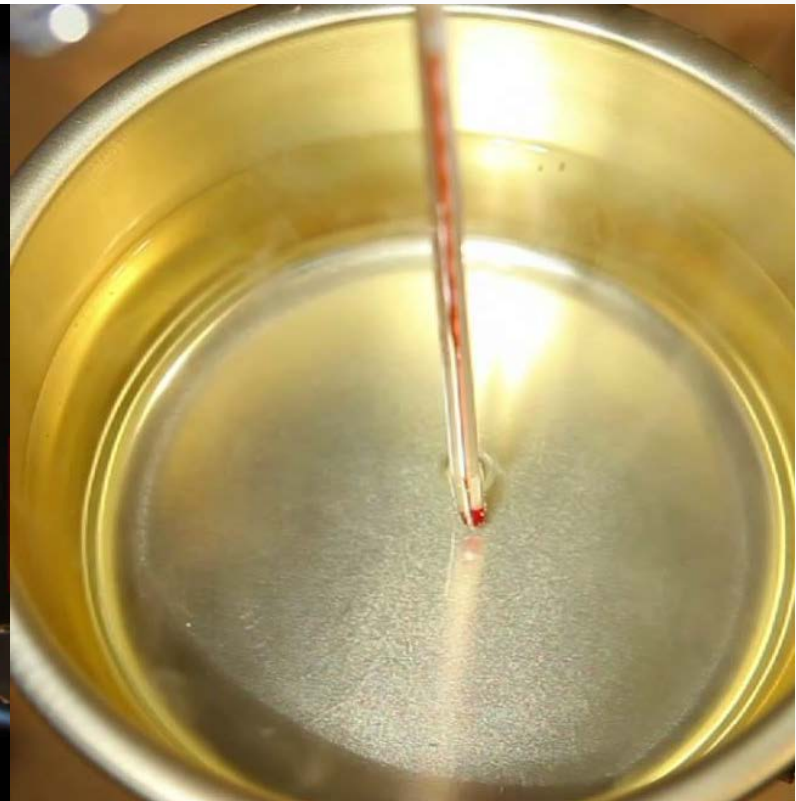
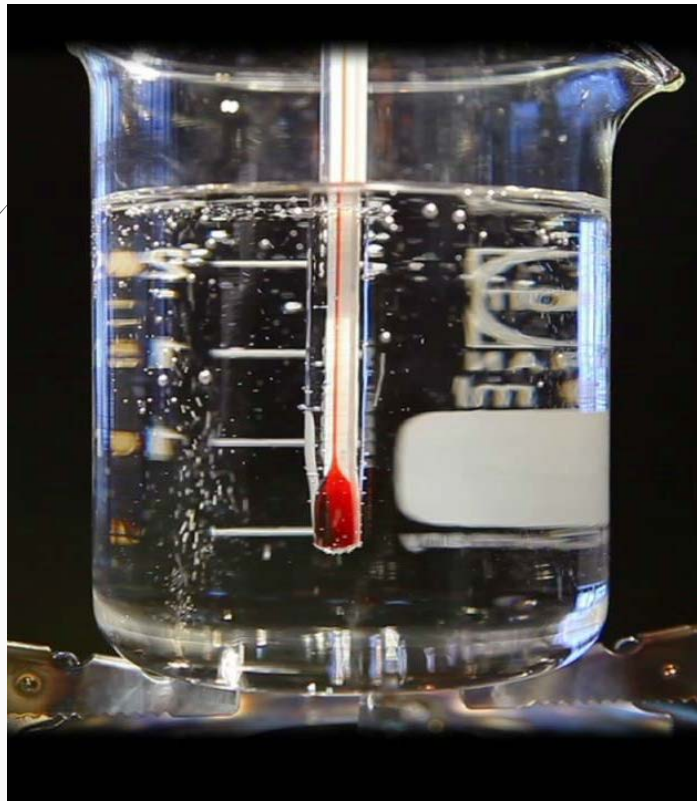
물의 끓는점은 정말 하나의 점인가?

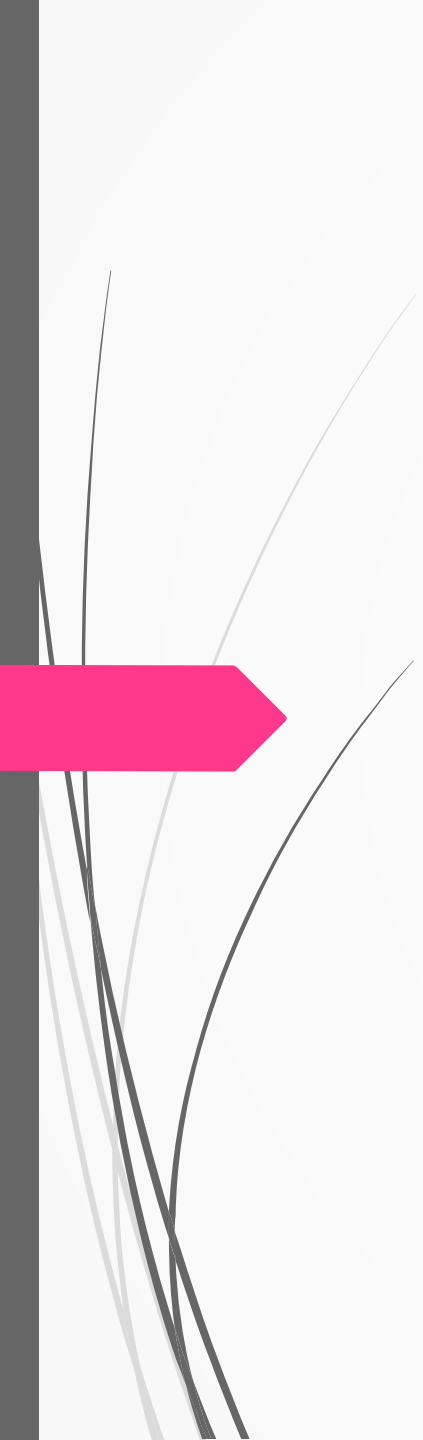


1760년경 제작된
조지 애덤스의 온도계에
표시된 두 가지 끓는점



물을 끓이는 용기가 다르다면?

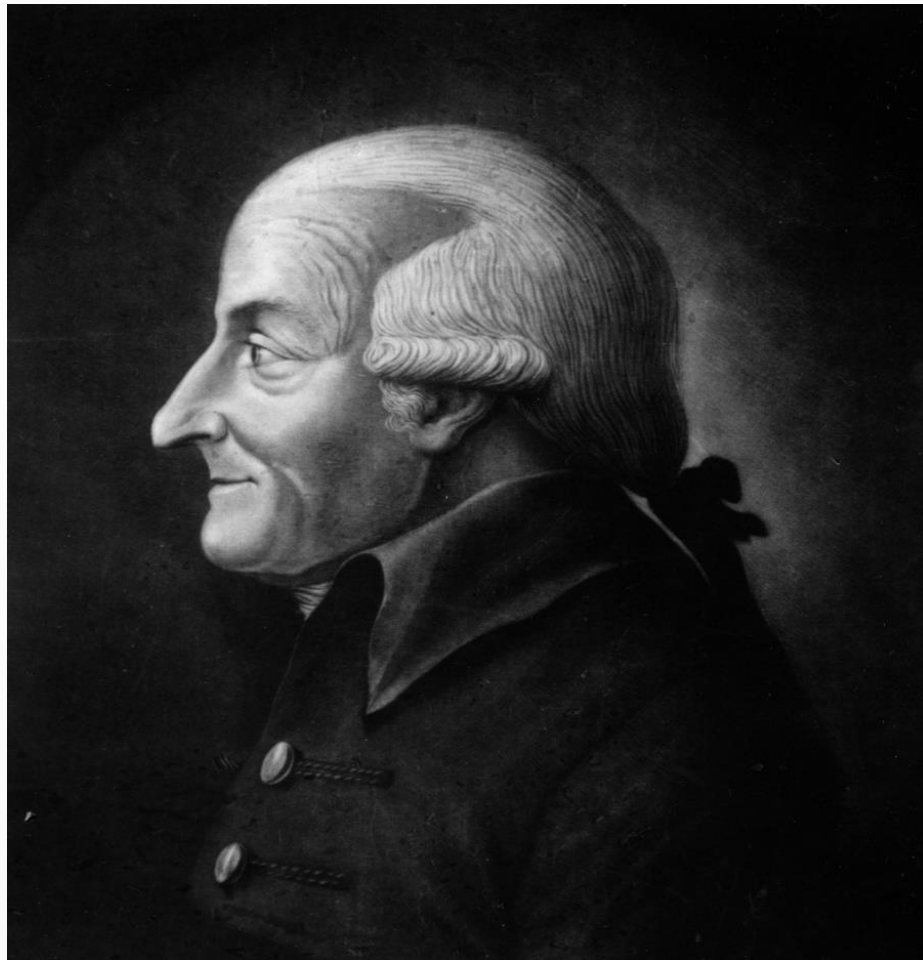




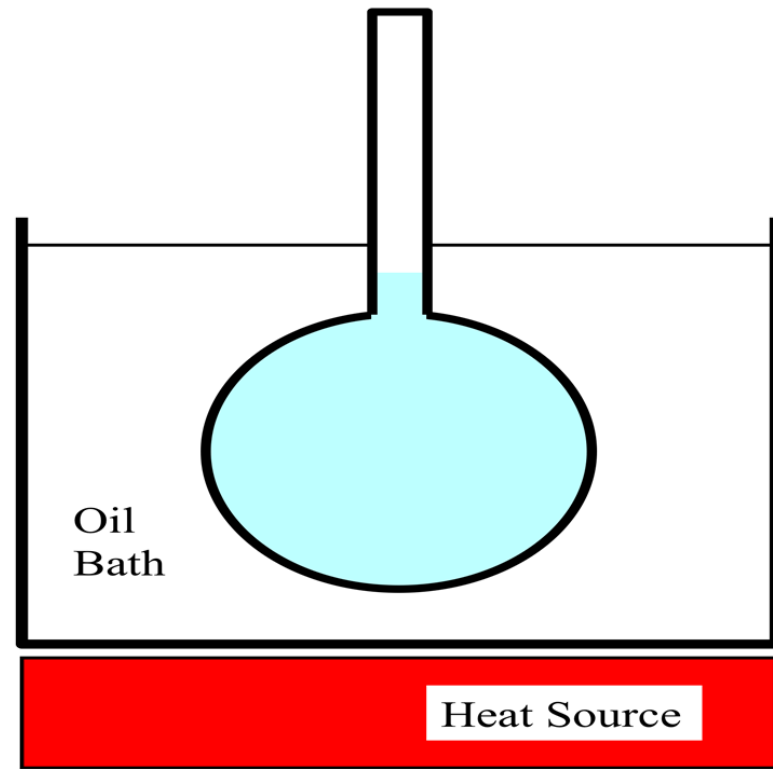
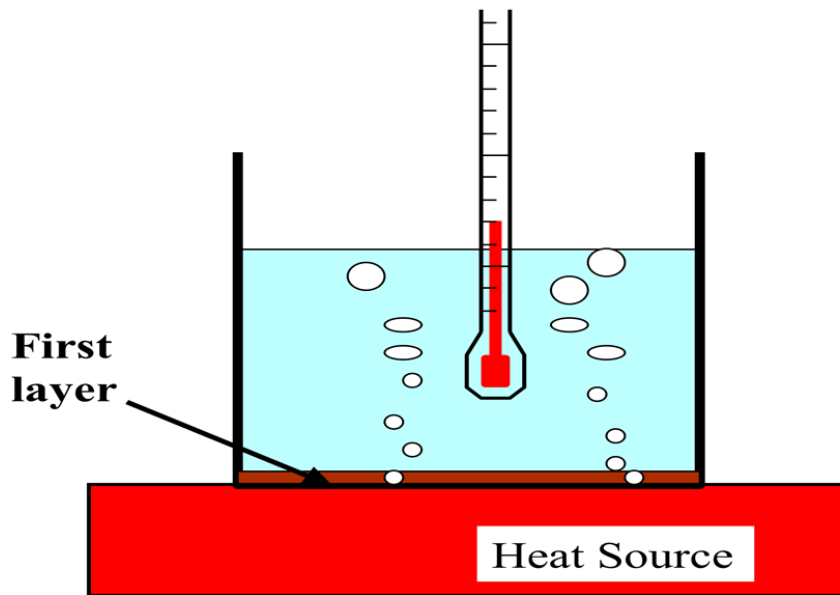
끓는점유리용기 > **끓는점**금속용기
(101.232℃) (100℃)

특정한 용기에서는 100℃보다 낮은 온도에서도 끓을 수 있음

드 퀴크(1727-1817)의 대기의 변형에 대한 연구(1772)



“진정한 끓음”을 관찰하기 위한 드릭의 실험 장치 변경



드 립의 “진짜 끓이기” 실험

- ▶ 느린 가열을 통한 물 끓이기 실험
- ▶ 물의 기체를 빼낸 후의 물 끓이기 실험
 - ▶ “이 흔드는 것을 4주일간 실시했고 그동안 플라스크를 거의 놓지 않았다. 잘 때나, 시내에서 일을 볼 때나, 두 손이 다 필요한 일을 할 때를 제외하고는 식사도, 독서도, 글쓰기도, 친구들과 만남도, 산책도, 나는 물을 흔들면서 했다.”
- ▶ 물에 녹은 공기를 뺄수록 훨씬 불규칙
- ▶ 물에 녹은 공기를 모두 뺀다면? 무슨 일이 벌어질지 알 수 없음.

고정점 변호하기

- ▶ 자연상태의 고정점 사용 불가능. 대신 인공적으로 만들어야.
- ▶ 즉, 고정성이 유지되는 분명한 조건을 찾거나 만들어내야.
- ▶ 고정성 변호를 위한 인식적 전략들
 - ▶ 쉽게 제거될 수 있는 변이 요인은 제거하라 : 고도, 대기압, 불순물
 - ▶ 제거하기 힘들지만 해명 가능한 변이 요인은 보정하라 : 대기압
 - ▶ 작은, 해명 불가능한 변이 요인들은 무시하라 : 물 속에 용해된 공기
- ▶ 다행히, 이러한 전략들은 ‘과가열’과 ‘물의 끓음’을 이해하기 위한 고차원적인 이론들과 무관하게 사용 가능



0℃와 100℃ 사이

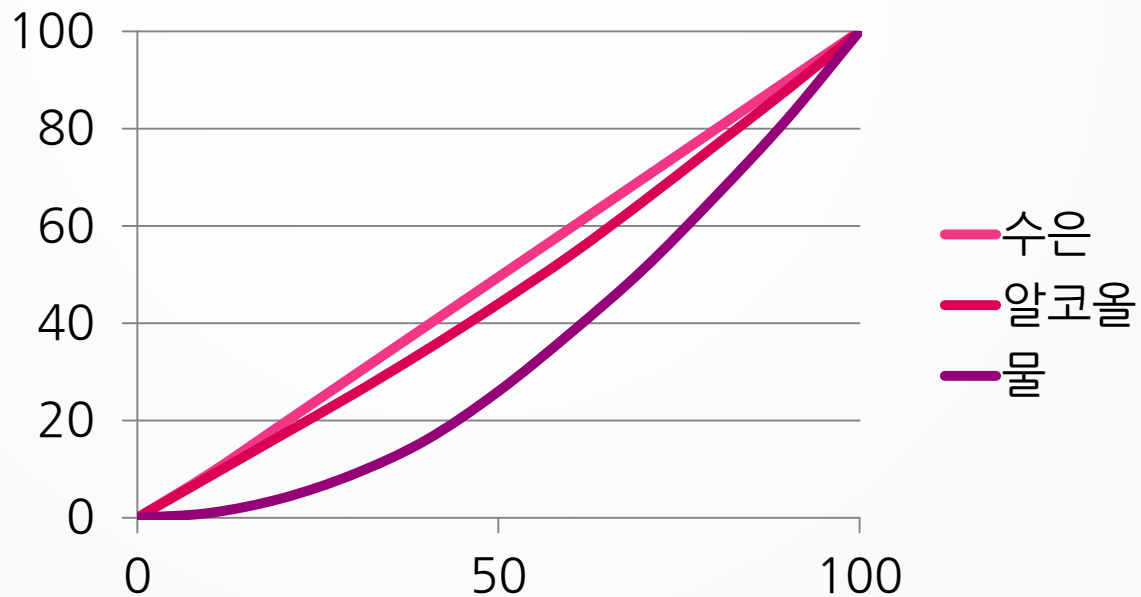
수은	알코올	물
0	0	0
25	22	5
50	44	26
75	70	57
100	100	100

법칙에 의거한 측정의 문제

1. 우리는 X (온도)를 측정하고자 하지만,
 2. X 는 직접 관찰할 수 없는 대신 직접 관찰할 수 있는 Y (액체의 부피)를 통해서만 추론될 수 있다.
 3. 이러한 추론을 위해서는 $X=f(Y)$ 형태의 법칙을 알아야 한다.
 4. 그러나 f 는 경험적으로 발견되거나 시험될 수 없다. 왜냐하면 이를 위해서는 Y 뿐 아니라 지금 측정하고자 하는 미지의 변수 X 도 알고 있어야 하기 때문이다.
- ▶ 요컨대, 온도를 온도계에 넣은 액체의 부피를 통해 측정하고자 한다면, 액체의 부피와 온도 사이의 법칙을 알아야 하지만, 그 법칙은 아직 알려져 있지 않으며, 거꾸로 그 법칙을 발견하고 검사하기 위해서는 온도를 먼저 알고 있어야 한다.

드릭의 혼합법

- ▶ 0°C의 물과 100°C의 물을 (100-x):x로 섞으면 x°C가 될 것이라는 가정을 이용해, 그 가정에 부합하는 계산값에 근접하는 온도계를 더 좋은 온도계로 평가하는 방법



혼합법의 비밀

- ▶ 실험가능한 몇몇 상황에 대한 X값의 이론치를 **실험에 의존하지 않고서 그럴듯한 이론적 가정으로부터 계산** 그 후 각각의 X에 따른 Y의 값을 실험을 통해 구함으로써 $Y=f(X)$ 를 실험적으로 제시.
- ▶ 수은의 경우 팽창계수 일정, 나머지는 팽창계수 계속 증가

혼합법의 한계

- ▶ 혼합법의 이면에 숨어있는 가정은?

“물의 동일한 온도 변화마다 동일한 양의 열이 필요하다”
물의 비열이 온도와 상관없이 일정하다는 가정

- ▶ 칼로릭 이론으로부터의 비판

- ▶ 어빈주의 그룹 : 서로 다른 온도의 물을 혼합하면 비열이 감소하면서 혼합물의 온도는 그들의 단순 평균보다 높아질 것이다.(돌턴)
- ▶ 화학주의 그룹 : 서로 다른 온도의 물을 혼합하면 비열이 증가하면서 혼합물의 온도는 그들의 단순 평균보다 낮아질 것이다.

기체는 이상적인 온도계?

- ▶ 기체의 부피 변화는 단순할 것이다!
- ▶ 이론적 추측 : 기체 입자들 사이의 거리는 무척 멀어서 그들 사이에 작용하는 힘은 무시할만할 것이기 때문에, 기체의 부피 팽창은 오로지 입자들 사이의 공간을 채우고 있는 칼로릭에 의존해 단순하고 균일할 것이다.
- ▶ 실험적 증거 : 모든 기체는 **종류에 상관없이** 대기압 하에서 **(수은 온도계로 잰) 온도 1°C 증가에 따른 부피 증가가 $V_{0^\circ\text{C}}/266.67$ 로 항상 일정하다.**(게이 루삭 1802, 돌턴 1802)
 - ▶ 이 법칙의 의미는? 기체의 부피가 ‘진정한’ 온도와 선형적? No!
 - ▶ 여러 기체와 수은의 열팽창 비율이 서로 일치한다는 뜻

공기 vs. 수은

- ▶ 100℃ 너머에서 수은 온도계와 공기 온도계의 눈금 불일치
 - ▶ 100℃ 너머에서 공기의 부피 팽창은 온도와 비선형적?
 - ▶ 100℃ 너머에서 수은의 부피 팽창은 온도와 비선형적?
- ▶ 공기 온도계의 200℃ ≠ 수은 온도계의 200℃
 - ▶ 두 온도계는 섞어서 사용할 수 없음.
 - ▶ 어느 온도계가 더 신뢰할 만할까?

빅토르 르뇨의 비교가능성 시험

- ▶ 수은 온도계는 시험 탈락 : 사용된 유리의 종류에 따라 (심지어 같은 종류의 유리를 사용한 온도계 사이에서도) 200°C 너머에서 어느 정도의 차이를 보임. 이는 하나의 '진정한 수은 온도계'라는 것이 없음을 말해줌. 200°C 너머에서 서로 다른 수은 온도계로 잰 온도값들은 같은 온도로 간주될 수 없음. 즉 수은 온도계들은 상호 비교가능한 측정장치가 아니다.
- ▶ 공기 온도계는 시험 통과 : 유리의 종류에 따라 차이가 날 위험이 없으며, 다양한 밀도의 공기를 집어넣고 비교해도 그 눈금이 달라지지 않음. 또한 대부분의 단일기체 온도계들도 공기 온도계와 동일하게 작동(황산기체 온도계는 예외). 따라서 공기 온도계들은 상호 비교가능한 측정장치로서, 서로 다른 다른 공기 온도계에서 측정된 온도값은 같은 온도로 간주될 수 있음.

비교가능성 시험의 비밀

- ▶ 이론적 가정의 최소화
 - ▶ 특정한 팽창 법칙(e.g., 공기의 부피 \propto 온도) 가정 X
 - ▶ 특정한 혼합 법칙 가정 X
 - ▶ 비열의 불변성 가정 X
- ▶ 비교가능성 시험에 전제된 유일한 가정 : 단일값의 원리
 - ▶ 신뢰할만한 온도계는 같은 상황에서 같은 온도를 가리켜야 한다.

비교가능성 시험의 한계

- ▶ 르노가 증명한 것 : 온도라는 물리량이 있고, 그것을 측정해야 한다면, 그에 대한 가장 신뢰할만한 측정장치는 공기 온도계임.
- ▶ 공기 온도계의 눈금은 참된 온도를 가리키는가?
 - ▶ 황산기체 온도계 vs. 공기 온도계 : 판정 불가
 - ▶ 황산기체 온도계의 팽창 계수는 공기 온도계에 의한 온도가 증가함에 따라 감소한다. vs. 공기 온도계의 팽창 계수는 황산기체 온도계에 의한 온도가 증가함에 따라 증가한다.
 - ▶ 르노의 비교가능성 시험은 ‘법칙에 의거한 측정의 문제’에 대한 충분한 해결책 제공하지 못함.

요약

- ▶ 측정기준의 정당화는 시험중인 기준과 독립적인 기준 필요로 함
- ▶ 후속 기준은 선행 기준에 의해 정당화, but 선행 기준 개선 가능
- ▶ 자연 상태의 끓는점은 고정되어 있지 않지만, 우리는 고정된 점을 찾아내거나 만들어낼 수 있음.
- ▶ 법칙에 의거한 측정의 문제는 불완전하지만 일부 해결 가능
 - ▶ 드 톱의 혼합법 : 이론적 온도를 실험에 의존하지 않고서 계산하고 그와 실험치를 비교할 수 있는 간단한 방법의 고안 / 이론적 온도 계산에 사용된 가정 불확실
 - ▶ 르노의 비교가능성 시험 : 이론적 온도를 전혀 가정하지 않고도 온도계의 신뢰성 평가 / 온도계와 온도 사이의 선형성 평가 불가능